

***Typha dominguensis* en humedales construidos de un sistema de tratamiento de aguas residuales, en periodo de contingencia COVID-19 en Tabasco, México**

Perla Pérez-Álvarez ¹, Carlos Alberto Torres-Balcázar ² y Gaspar López-Ocaña ^{2,*}

¹ Ingeniería Ambiental, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México.

² Laboratorio de Tecnología del Agua, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: e- ocanagl77@hotmail.com Tel.: +52 9931933824.

Desarrollo Sustentable (Humedales naturales y construidos). **Ponencia Virtual.**

Recibido: 3 de mayo de 2023

Aceptado: 15 de junio de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: Los humedales construidos se han aplicado en núcleos rurales y comunidades de mediana población por su bajo consumo de energía, fácil instalación y operación, siendo eficientes en la remoción de nutrientes, materia orgánica y metales pesados. Durante la contingencia sanitaria COVID-19, en las localidades variaron los volúmenes y características del agua residual, lo que hizo a los humedales construidos una alternativa más viable. En este estudio se evaluó el sistema de tratamiento La Huerta en Centro, Tabasco, compuesto por cárcamo-desarenador-rejillas, reactor anaerobio, dos humedales construidos en serie, estanque de algas y cárcamo de aguas tratadas, durante el verano e invierno del 2021, con el objetivo de ver su comportamiento hidráulico, eficiencia y cumplimiento con las implicaciones presentes por la contingencia. Se aforó para conocer el gasto de operación (método volumétrico) y se tomaron muestras durante dos semanas (verano e invierno) de los parámetros de control (pH, temperatura, SDT, turbiedad, color y DQO). Se encontró que en esta localidad el caudal disminuyó al igual que los contaminantes, siendo el gasto medio de 15.3 L/s con respecto al gasto de diseño de 25 L/s. El sistema alcanzó la mayor remoción de DQO con 84.1% en julio, pero durante diciembre se eliminaron las algas del estanque, lo que bajó la eficiencia a 43.7%. Este sistema de tratamiento cuenta con dos humedales de flujo libre en serie con *Typha dominguensis* y presentan corto circuito, sin embargo, el sistema cumple con los parámetros de descarga para pH, temperatura y DQO establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, siendo el principal parámetro la DQO que establece un PM de 100 mg/L y PD de 120 mg/L. Con la recomendación de habilitar el estanque de algas y la introducción de otras macrófitas puede mejorar la eficiencia el humedal y en general el sistema de tratamiento.

Palabras clave: Biorremediación; Demanda química de oxígeno; Humedal construido de flujo libre; Reactor anaerobio; *Typha dominguensis*.

***Typha dominguensis* in constructed wetlands of a wastewater treatment system, during the COVID-19 contingency period in Tabasco, Mexico**

Abstract: Constructed wetlands have been applied in rural areas and medium-sized communities due to their low energy consumption, easy installation and operation, being efficient in the removal of nutrients, organic matter and heavy metals. During the COVID-19 health contingency, the volumes and characteristics of wastewater varied in the localities, which made constructed wetlands a more viable alternative. In this study, the La Huerta treatment system was evaluated in Centro, Tabasco, consisting of a storage tank-sand trap-grids, an anaerobic reactor, two wetlands built in series, an algae pond and a pit for treated water, during the summer and winter of 2021. with the objective of seeing its hydraulic behavior, efficiency and compliance with the present implications of the contingency. It was measured to know the operating cost (volumetric method) and samples were taken for two weeks (summer and winter) of the control parameters (pH, temperature, SDT, turbidity, color and COD). It was found that in this locality the flow decreased as well as the pollutants, with an average flow of 15.3 L/s compared to the design flow of 25 L/s. The system achieved the highest COD removal with 84.1% in July, but during December the algae from the pond was removed, which lowered the efficiency to 43.7%. This treatment system has two free-flow wetlands in series with *Typha dominguensis* and they present a short circuit, however, the system complies with the discharge parameters for pH, temperature and COD established in NOM-001-SEMARNAT-2021, being the main parameter is COD, which establishes a PM of 100 mg/L and a PD of 120 mg/L. With the recommendation to enable the algae pond and the introduction of other macrophytes, the efficiency of the wetland and the treatment system in general can be improved.

Keywords: Bioremediation; Chemical oxygen demand; Free flowing constructed wetland; Anaerobic reactor; *Typha dominguensis*.

Introducción

Un humedal construido (HC) es una ecotecnología que, mediante procesos de biotransformación y mineralización, reducen la concentración de carbono, nitrógeno, fósforo y metales como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio (Martelo y Lara, 2012). Los principales componentes son la vegetación, representada por las plantas vasculares terrestres y/o acuáticas, los microorganismos y el medio de soporte constituido por agregados pétreos. Las

plantas acuáticas que se utilicen son importantes, ya que difieren en la capacidad de remoción de nutrientes específicos, elementos traza y de compuestos tóxicos como los metales pesados (Arteaga et al., 2019). Una clasificación de estos humedales según la dirección del flujo es: humedales de flujo libre (HCFL), humedales con flujo horizontal subsuperficial (HCFS-H); sistema con flujo vertical (HCFS-V) y sistemas híbridos (SH) (CONAGUA, 2019a). Se han aplicado en núcleos rurales por su bajo consumo de energía, fácil instalación y operación (Tran et al., 2019), son utilizados como tratamiento secundario para reutilizar los efluentes combinando flujos subsuperficiales (vertical-horizontal) alcanzando remociones de DBO superiores al 77% y DQO superiores al 60%, con especies como *Pennisetum pedicellatum* y *Cyperus rotundus* con tiempos de retención de 12 y 24 horas (Thalla et al., 2019). Marín-Muñiz et al., (2023) analizaron 67 estudios de HC en México, estos se clasificaron según el área de tratamiento en microcosmos, mesocosmos, escala piloto y escala completa al 18, 30, 25 y 27%, respectivamente. Los HC más utilizados son los HCFS (87 %) y los HCFL (13 %), de los cuales los HCFS-H (58 %) es la más común. Considerando los HC a gran escala, la eliminación de contaminantes informada para DQO, DBO₅, NT y PT osciló entre 50 y 90 %, 60 y 90 %, 30 y 90 % y 30 y 70 %, respectivamente. Se encontraron 78 especies diferentes de vegetación en los HC, dentro de las más comunes son las especies hidrófitas *Typha* y *Cyperus*, ornamentales como *Zantedeschia aethiopica*, género *Canna*, *Heliconia*, *Hedychium coronarium* y *Anturium andreaeanum*. Esto muestra un avance de la ecotecnología en el tratamiento descentralizado de aguas residuales en México, por lo que sugiere implementarse a gran escala, para atender problemas de contaminación en regiones rurales y urbanas con características tropicales y subtropicales similares a las de México. El presente estudio evaluó la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del fraccionamiento La Huerta en Centro, Tabasco, en el periodo de contingencia ambiental COVID-19 en verano e invierno del 2021. La PTAR está integrada por cárcamo-desarenador-rejillas, reactor anaerobio, dos humedales construidos en serie, estanque de algas y cárcamo de aguas tratadas. Esta planta fue construida para servir a una población de 10,000 habitantes, con un Q de diseño de 25 L/s. Es importante conocer las condiciones actuales de la biorremediación de aguas residuales, ya que esta planta tiene más de 8 años en operación y tanto la vegetación como el medio de soporte no ha recibido mantenimiento. Típicamente estos sistemas quedan en abandono por los organismos operadores y no cuentan con un mantenimiento preventivo y correctivo de las unidades de tratamiento (CONAGUA, 2019b).

Materiales y Métodos

Área de estudio

La PTAR del fraccionamiento la Huerta, en el municipio de Centro, Tabasco, se encuentra ubicada en carretera Villahermosa- Frontera Km 9.5, en la calle Zarzamora s/n (513161.00 m E, 1998817.00 m N). El periodo de estudio fue durante el verano (julio) e invierno (diciembre) del 2021.

Descripción del proceso

El proceso inicia con un cárcamo con rejillas para la eliminación de sólidos gruesos o voluminosos (<5 cm). Posteriormente el agua es transportada por bombeo al reactor anaerobio pasando por cribas finas, donde se eliminan partículas de menor tamaño ($\varnothing= 1.5$ cm) y remueven entre 40 y 70% de SST. Enseguida el agua ingresa a dos HCFL en serie con *Typha dominguensis* (13 plantas/m²), con tirante de agua de 0.6 m, medio de soporte grava de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro con 0.15 m de espesor, diseñado para remover entre 80 y 90% de DBO-DQO. Posteriormente el agua pasa a un estanque serpentin de algas, diseñado para remover entre 80-90 % de nutrientes (N y P) y por último el agua es captada por un cárcamo que envía el agua a un cuerpo receptor natural (laguna) (Figura 1). Durante este periodo el tren de tratamiento no contaba con sistema de desinfección.

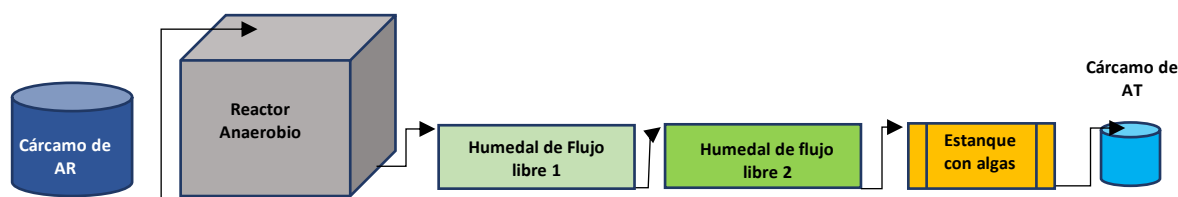


Figura 1. Diagrama de unidades de proceso de la Planta de tratamiento de aguas residuales La Huerta.

Aforo y evaluación hidráulica

Se aforó para conocer el gasto de operación con el método volumétrico midiendo el tiempo de llenado del cárcamo como lo establece Briones y García (2014), en horario de 9:00 am a 10:00 pm. Se monitoreó durante dos semanas tomando una muestra simple diaria (10:00 horas). Una vez conocido los gastos se determinaron los volúmenes de las unidades y se procedió a calcular los tiempos de retención hidráulica (TRH) conforme lo establece CONAGUA (2019a y 2019c).

Caracterización fisicoquímica

Para reducir los errores experimentales y aplicar las pruebas estadísticas, las determinaciones analíticas se efectuaron por triplicado. Los métodos usados para la medición de los parámetros fueron: pH (SM 4500 B), temperatura (SM 2550 B), SDT (SM 2540), los cuales fueron medidos con el equipo Hanna® HI98129, el potencial óxido reducción (ASTM D1498-00) medidos con el equipo Hanna® HI 98121, la turbiedad se determinó por el método SM 2130 B, utilizando el equipo Hanna® HI 98703 con precisión de 0.01 UNT, el color se determinó mediante el método APHA 2120, con el equipo Lamotte® con una precisión de 0.1 UC modelo LTC y la DQO (USEPA 410.4) fue medida con el equipo Hanna® HI839800-01.

Eficiencia de remoción y análisis de datos

La eficiencia del proceso se estimó con las concentraciones del afluente y el efluente como las determinó Romellón et al., (2022). Para el análisis de los datos se empleó un diseño simple dirigido a los tratamientos de la PTAR, analizando como variables dependientes tales como: el pH, la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, el color aparente, la turbiedad, el potencial oxido reducción y la DQO. Se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre las secciones de la PTAR con un análisis de varianza de Kruskal – Wallis, debido a que los datos no son paramétricos (no son normales y homocedásticos), y un contraste de medianas W de Mann – Whitney para determinar diferencias estadísticamente. Todos los datos fueron analizados con el software STATGRAPHICS versión 16.1. El número de repeticiones fue de tres muestras al día por cada tratamiento

Composición elemental y contenido energético

Se tomaron cinco plantas de cada celda de humedal para determinar la composición elemental de la biomasa de *T. dominguensis*. Este parámetro fue determinado por los reportes de incendio de las celdas de humedales. Para la determinación de componentes elementales de biomasa vegetal se realizaron los análisis correspondientes conforme se establecen las normas técnicas mexicanas de residuos sólidos urbanos (GAM, 2000), para los parámetros como carbono (C, NMX-AA-021-1985), hidrógeno (H, NMX-AA-068-1986), oxígeno (O, NMX-AA-080-1986), nitrógeno (N, NMX-AA-24-1984), azufre (S, NMX-AA-92-1984), cenizas (Cs, NMX-AA-18-1984) y humedad (Hu, NMX-AA-016-1984). Una vez conocida la composición elemental se analizó el contenido energético de la biomasa mediante la ecuación de Dulong modificada, la cual se presenta a continuación en la ecuación 1 (Tchobanoglus, 1994):

$$Btu/Lb = [145 (C) + 610 (H_2 - (1/8 * O_2)) + 40 (S) + 10 (N)] \quad (1)$$

Donde C, H, O, N y S son componentes elementales en porcentaje en peso (%); 145 es la constante para la determinación del contenido energético del carbón; 610 es la constante para la determinación de contenido energético del hidrógeno; 40 es la constante para la determinación de contenido energético en el azufre; 10 es la constante para la determinación de contenido energético con el nitrógeno; 1/8 es la constante que divide al oxígeno y se resta del hidrogeno para justificar la cantidad de hidrógeno que reacciona con el oxígeno presente y que no contribuye al contenido energético de la biomasa vegetal.

Resultados y Discusión

Gasto de operación y evaluación hidráulica

Durante los días evaluados se obtuvo que el Q_{med} de operación fue de 15.3 (± 3.98) L/s, no se rebasa el Q diseño de esta planta que es de 25 L/s. La PTAR opera intermitentemente arrancado cada 45 a 60 minutos para evitar la generación de olores del cárcamo. La variación del Q durante la semana muestra que el $Q_{m\acute{a}x}$ se presenta miércoles con 23.3 (± 2.1) L/s, mientras que el domingo se presenta un $Q_{m\acute{i}n}$ con 12.5 (± 1.3) L/s. Este comportamiento de la localidad es conocido como ciudades dormitorio, que es un espacio territorial en la cual sus residentes normalmente trabajan en otra urbe. Estas tienen poca actividad económica más allá de pequeños establecimientos para sus habitantes por lo que no se ha rebasado el Q diseño del sistema.

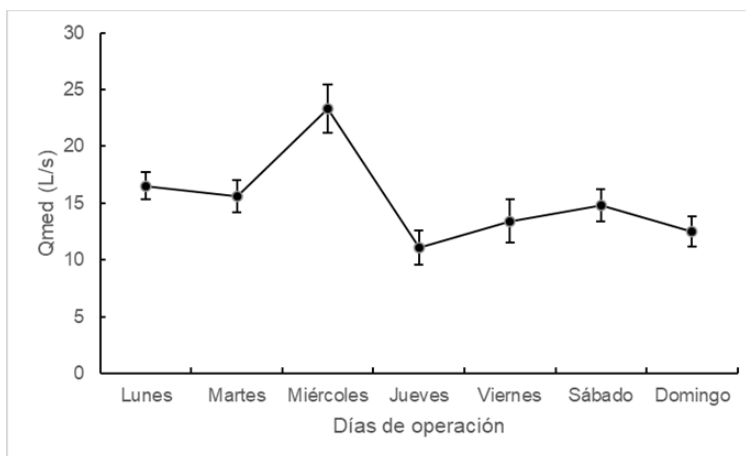


Figura 2. Comportamiento promedio ($\pm DE$) del Q de operación en la PTAR La Huerta ($N=14$).

Los TRH fueron estimados por unidad de proceso y se presentan en la tabla 1, sin embargo, con el Q_{med} operación el TRH total fue de 48.1 horas, siendo superiores al de diseño que es de 25.2 horas. Esto permite tener un mayor tiempo de contacto con microorganismos y plantas, por lo que este factor favorece al sistema de tratamiento mejorando la eficiencia de remoción de contaminantes según lo recomendado por manuales y criterios de diseño y operación (Crites y Tchobanoglous, 2000; CONAGUA, 2019a, 2019c).

Tabla 1. Evaluación hidráulica de la PTAR La Huerta. Julio de 2021. ($N=14$).

Unidad de Proceso	Dimensiones de las unidades			TRH QD		TRH Q_{med}	
	Área (m ²)	Ti (m)	Vol (m ³)	días	horas	días	horas
Cárcamo	49	8	392	0.18	4.4	0.3	8.0
R. Anaerobio	144	8	1152	0.53	12.8	1.0	23.5
HCFL 1	485	1	315.3	0.15	3.5	0.3	6.4
HCFL 2	485	1	315.3	0.15	3.5	0.3	6.4
E. de algas	180	1	180	0.08	2.0	0.2	3.7

Un cárcamo en condiciones típicas de operación en zonas tropicales como Centro, Tabasco, debe bombear el agua residual cada 45 minutos como máximo para evitar la descomposición anaerobia del agua y evitar que esta se convierta séptica generando gases (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) (Pampillón et al., 2019), pues esto favorece la velocidad de corrosión de las superficies e infraestructura metálicas y de concreto tanto por bacterias como por gases con el H₂S (De Turrís et al., 2013). En ese sentido los TRH recomendados para los reactores anaerobios son de 6 a 12 horas, si sólo removerán sólidos suspendidos, pero si realizan desdoble de materia orgánica se recomiendan operar de más de 12 horas hasta 4 días (CONAGUA, 2019c). En el caso de los humedales construidos los TRH recomendados van de 3.5 a 7 días para degradación de materia orgánica y nutrientes (Solís et al., 2016; López et al.,

2019). En el caso de los humedales construidos que operan como un postratamiento (secundario o terciario) pueden tener TRH menores a un día (Romellón et al., 2022).

Calidad del agua del sistema de tratamiento

La calidad del agua que recibe la PTAR está dentro del rango de agua débil según lo establece Tchobanoglous “Metcalf y Eddy” (2003), pues la concentración de DQO es menor a 250 mg/L, tanto para el periodo de junio 2021 (tabla 2) y diciembre 2021 (tabla 3). Sin embargo, en ambos muestreos la concentración del efluente fue menor a 100 mg/L el cual es el límite máximo permisible de descarga establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021, este es el mismo caso para temperatura y pH que se encuentran dentro del límite establecido que es una temperatura menor a 40°C y pH entre 6.5 y 8.5. En el segundo muestreo realizado en diciembre de 2021, se realizó la limpieza en el estanque de algas y al quitarlas del estanque casi en su totalidad, provocó baja remoción de la concentración de la DQO con respecto a la del monitoreo de julio, ya que las algas removían materia orgánica y nutrientes en esta última etapa.

Tabla 2. Valores promedio ($\pm DE$) de las unidades de la PTAR la Huerta, (verano de 2021). ($N=7$).

Tratamiento	pH (UpH)		Temp. (°C)		CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		SDT (mg/L)		Color (UC)		Turbiedad (UNT)		POR (mV)		DQO (mg/L)	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Cárcamo	7.5	0.1	30.7	0.4	966.3	12.6	482.3	4.7	1678.0	13.1	27.3	1.0	-275.0	6.6	184.5	6.8
R. Anaerobio	7.7	0.1	27.7	0.2	370.7	2.1	189.3	6.7	382.7	6.4	5.7	0.4	-76.7	9.5	38.7	2.7
HAFL-Td	7.6	0.0	27.4	0.6	847.3	0.6	423.7	0.6	632.3	15.2	18.2	0.9	-165.3	3.2	122.9	5.9
E. Algas	8.9	0.2	27.7	0.1	615.3	3.2	307.3	1.5	605.7	4.9	4.3	0.3	-70.3	10.2	29.3	1.7

Tabla 3. Valores promedio ($\pm DE$) de las unidades de la PTAR la Huerta, (invierno de 2021). ($N=7$).

Tratamiento	pH (UpH)		Temp. (°C)		CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		SDT (mg/L)		Color (UC)		Turbiedad (UNT)		POR (mV)		DQO (mg/L)	
	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Cárcamo	7.3	0.0	31.0	0.5	550	24.5	275	11.8	709	8.0	11.4	0.1	-225	5.2	76.7	0.8
R. Anaerobio	7.6	0.0	28.5	0.1	332	1.2	166	0.6	356	30.6	3.5	0.4	-35	5.7	23.9	2.6
HAFL-Td	7.4	0.0	27.5	1.0	844	1.0	422	0.6	487	18.7	12.1	0.7	-198	13.7	81.7	4.7
E. Algas	8.2	0.3	28.1	0.1	807	1.7	403	1.0	738	32.7	6.4	0.2	-49	6.2	43.2	1.3

Comportamiento de las unidades la PTAR

El valor mediano más bajo para pH se reporta en el Cárcamo con un pH de 7.54 UpH, seguido del HCFL con 7.62 UpH y el más alto está en el tratamiento E algas con 8.9 UpH, lo que indica que el proceso al final tiende a alcalinizarse promoviendo una eliminación de patógenos de manera natural en el proceso de tratamiento (Figura 3a). La temperatura mediana más baja se presenta en el HCFL con 27.4 °C, seguida del E algas con 27.7 °C y el valor más alto en el Cárcamo con 30.8 °C (Figura 3b), siendo esta última temperatura típica de un proceso anaerobio donde la mayoría de los microorganismos establecidos son mesófilos (Chiva et al., 2018).

El valor mediano más bajo de CE se encuentra en Reactor anaerobio con 370.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido del tratamiento E algas con 614.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el tratamiento más alto se reporta en el Cárcamo con 968.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4a). Es importante señalar que en el caso del reactor anaerobio presenta una mayor reducción o asimilación de iones presentes por los microorganismos que empiezan a realizar el desdoble de materia orgánica aceptando donadores de electrones en el proceso de degradación. En el caso de este parámetro las descargas se encuentran dentro los límites establecidos por los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89) que establece una concentración de 1011 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para su descarga a cuerpos receptores en México. En el caso de los SDT el valor mediano más bajo se presenta en el Reactor anaerobio con 186.0 mg/L, seguido del tratamiento E algas con 307.0 mg/L y el tratamiento más alto se reporta en el Cárcamo con 484.0 mg/L (Figura 4b). Los SDT son el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica, en

el tratamiento final se obtuvo un resultado superior a 580 mg/L, concentración inferior a 1000 mg/L, que es el límite permisible cumpliendo con límite máximo permisible de NADF-003-AGUA-2002, norma que se utiliza de referencia para este parámetro.

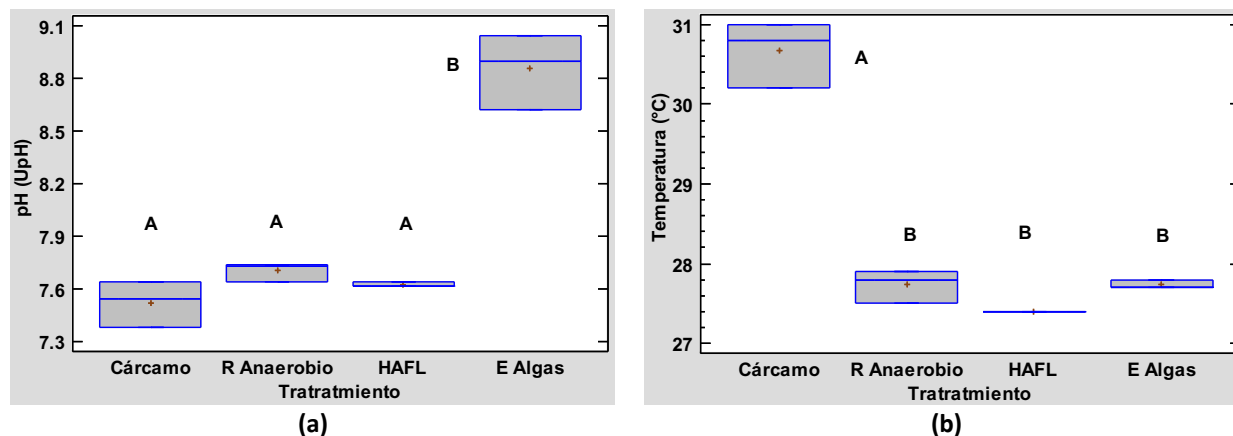


Figura 3. Valores medianos \pm (Q1, Q3) para la variable pH, (N=14) (a). Valores medianos \pm (Q1, Q3) para la variable temperatura, (N=14) (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$).

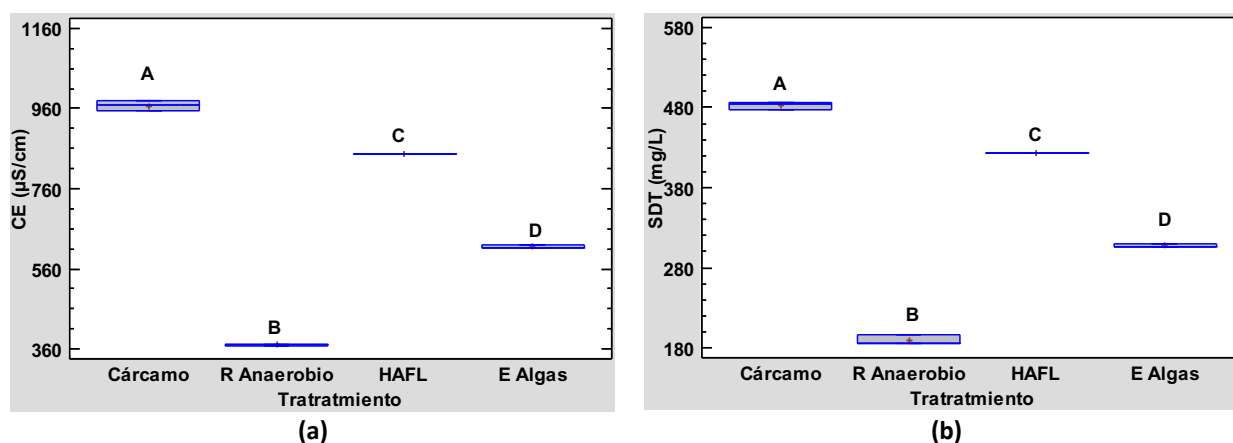


Figura 4. Valores medianos \pm (Q1, Q3) para la variable CE, (N=14) (a). Valores medianos \pm (Q1, Q3) para la variable SDT, (N=14) (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$).

El valor mediano más bajo de color se encontró en el Reactor anaerobio con 379.0 UC, seguido del tratamiento E algas con 608.0 UC y el tratamiento más alto se reporta en el Cárcamo con 1672.0 UC (Figura 5a). El color en las aguas residuales es causado por los sólidos en suspensión, material coloidal y sustancias en solución (Crites y Tchobanoglous, 2000) en ambos monitoreos se obtuvieron valores mayores a 600 UC de color en el efluente, sin embargo este parámetro fue menor en el Reactor anaerobio, lo que indica que se presentó un corto circuito debido a que este parámetro incrementa su concentración de salida como consecuencia de la descomposición de la biomasa vegetal cuando las plantas cumplen su ciclo de vida. Los valores obtenidos no cumplen con el NOM-001-SEMARNAT-2021. El valor mediano más bajo de turbiedad se encontró en el tratamiento de E algas con 4.3 UNT, seguido del tratamiento Reactor anaerobio con 5.8 UNT y finalmente el tratamiento más alto se reportó en el Cárcamo con 27.7 UNT (Figura 5b). La turbiedad es materia en suspensión y coloidal, dividida en plancton y otros organismos microscópicos; los cuales son cofactores que se asocian a la eliminación de patógenos cuando esta decrece favorablemente en el efluente tratado (Acevedo et al., 2012).

El valor mediano más bajo de POR se encontró en el tratamiento de E algas con -66.0 mV, seguido del tratamiento Reactor anaerobio con -77.0 mV y el tratamiento más alto se reporta en el Cárcamo con -276.0 mV (Figura 6a). Las lecturas de POR menores de -100 mV indican condiciones anaerobias, lo que muestra que todo el sistema presenta condiciones anaerobias, como consecuencia los microorganismos alteran las condiciones del potencial de óxido reducción y transforman los contaminantes (compuestos de nitrógeno a través de la nitrificación) y los hacen

asimilables para las plantas (CONAGUA, 2019a). La prueba de Kruskal-Wallis evaluó la hipótesis de que las medianas de DQO (mg/L) dentro de cada uno de los 4 niveles de Tratamiento son iguales, el valor-P es <0.05 , por lo que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas (95.0% de confianza). El valor mediano más bajo de DQO se encontró en el tratamiento de E algas con 29.0 mg/L, seguido del tratamiento Reactor anaerobio con 39.2 mg/L y el tratamiento más alto se reporta en el Cárcamo con 187.0 mg/L (Figura 6b). La DQO es importante de evaluar en estas unidades de tratamiento pues oxidan químicamente los materiales orgánicos e inorgánicos del agua. Según la NOM-001-SEMARNAT-2021 el límite máximo permisible es de 150 mg/L para infiltración, uso público y para uso agrícola de 200 mg/L, por lo que sí cumple con lo establecido en su descarga pues la descarga fue de 29 mg/L y de 42 mg/L de DQO para verano e invierno del 2021.

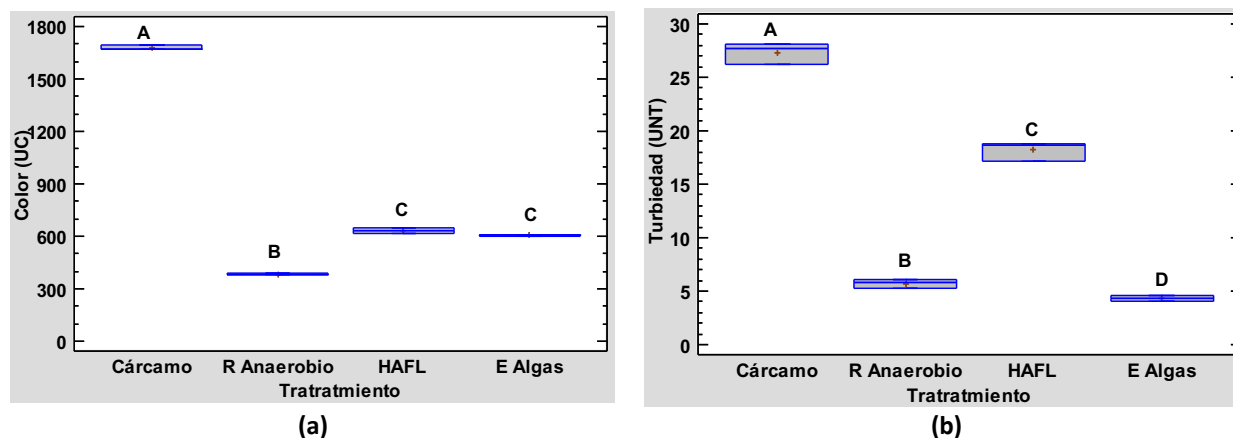


Figura 5. Valores medianos \pm (Q_1 , Q_3) para la variable Color, ($N=14$) (a). Valores medianos \pm (Q_1 , Q_3) para la variable turbiedad, ($N=14$) (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p<0.05$).

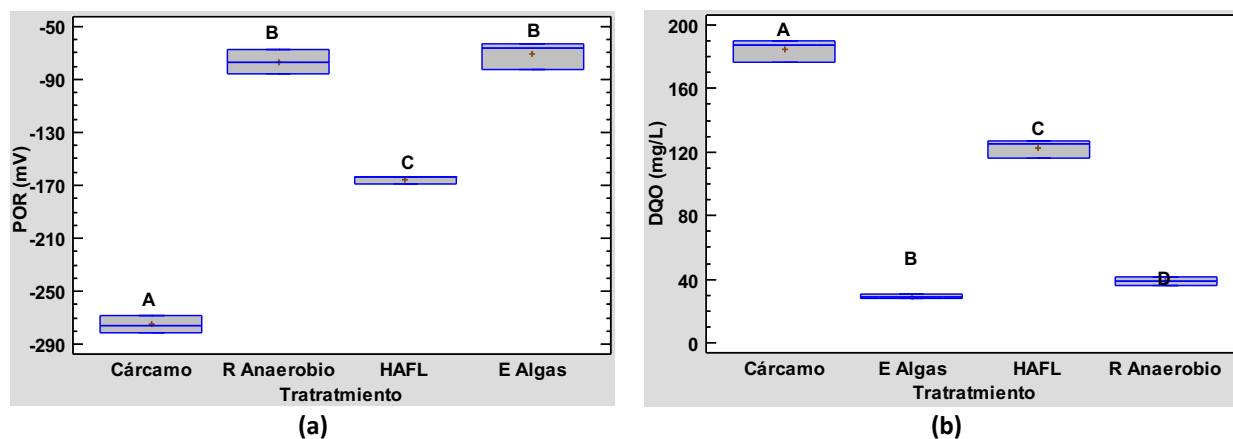


Figura 6. Valores medianos \pm (Q_1 , Q_3) para la variable POR, ($N=14$) (a). Valores medianos \pm (Q_1 , Q_3) para la variable DQO, ($N=14$) (b). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p<0.05$).

Solís et al., (2016), evaluó la especie *Typha latifolia* en HCFL experimentales con capacidad de tratamiento de 200L/día y 7.5 días de TRH, logrando remover 97.1% de turbiedad, 83.4% de Color, 97.5% de DBO, 97.8% de DQO, 97.2% de NT, 91.1% de PT y 97.7% de SST, durante su primer año de operación. Estos resultados difieren significativamente de los resultados de los humedales de la Huerta pues las eficiencias de DQO, color y turbiedad son negativas (-), debido a que este humedal lleva más de ocho años de operación sin mantenimiento en medio de soporte, renovación de especies, limpieza de celdas, etc., dejando la labor de remoción de contaminantes al estanque de algas; los humedales y el estanque trabajan como postratamiento secundario pues el TRH es de 15 horas. Li et al., (2013), encontró que las bacterias desarrolladas en raíces de *Typha angustifolia* L., eliminan PT y materia orgánica, sin embargo, esta propiedad se va perdiendo. Hoffmann et al., (2011), establece que después de dos años la porosidad, velocidad del agua y conductividad del agua, cambian y disminuyen debido al desarrollo de las raíces de las plantas y a la acumulación de residuos no degradables que se quedan en el medio de soporte, bajando la eficiencia del sistema de humedales.

Eficiencia de remoción

La remoción de contaminantes fue mayor en el verano y menor en el invierno. En el verano la remoción de la DQO fue de 84.1% y el invierno el promedio alcanzó el 43.7%. Este comportamiento se debe en parte a la temperatura ambiental del agua, que al bajar en invierno interviene en el desempeño de los organismos mesófilos (Kadlec y Wallace, 2009; Chiva et al., 2018), aunado al efecto de la falta de poda que hace el fenómeno de corto circuito para parámetros como color, CE y SDT, donde la concentración del efluente es mayor al afluente dando una eficiencia negativa (-) (Vázquez y López, 2011; Romellón et al., 2022). En la figura 7 se muestra la remoción de contaminantes y el efecto de la eliminación de algas en la DQO, por lo que no es necesario remover por completo las algas durante los mantenimientos, pues estas favorecen la eliminación de carga orgánica, nutrientes y coliformes. Por lo anterior al finalizar esta evaluación se recomendó sembrar algas y macrófitas flotantes en el estanque (serpentín) y en el último canal colocar grava de ¾ de pulgadas para filtrar las algas para no incrementar la concentración de DQO en el efluente, finalizando con un sistema de desinfección de UV para la eliminación de patógenos en el efluente.

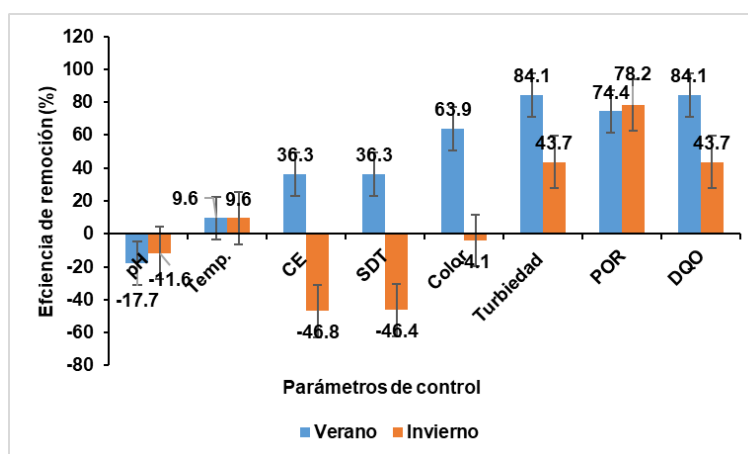


Figura 7. Eficiencia de remoción promedio ($\pm ES$) de julio y diciembre de los parámetros de control ($N=7$).

Composición elemental y contenido energético de *Typha domingensis*

La composición elemental obtenida de la biomasa vegetal de *T. domingensis* fue de 34.3% de C, 5.1% de H, 29.8% de O, 1.2% de N, 0.3% de S, 4.4% de cenizas y 24.8% de agua, resultando este material un combustible de bajo poder calorífico muy parecido a los residuos lignocelulósicos derivados de residuos sólidos urbanos (López, 2017), pues se estimó que el contenido energético es de 3275 kcal/kg de biomasa seca de *T. domingensis*. Esto muestra que la especie puede incendiarse cuando los campos aledaños de agricultura temporal o pastoreo se incendian (roza, tumba y quema), a pesar de estar prohibida esta práctica forestal en Tabasco. Por lo anterior, se podrían combinar especies en el humedal como *Pontederia sagittata* (61.02% agua), *Thalia geniculata* (42.86% agua) y *Sagittaria lancifolia* (68.5% agua), pues son especies con mayor contenido de humedad (Romellón et al., 2022), lo que hace más difícil su combustión y debe considerarse un manejo de poda y cosecha de las especies, siendo estas últimas las más viables de manejar por no perder humedad como la hace la *Typha* en su ciclo de vida. En la tabla 4 se muestran las características de la *T. domingensis* en los humedales construidos de la PTAR la Huerta.

Tabla 4. Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfométricas *Typha domingensis* Pers ($N=10$).

Parámetro	Etapas final HAFL
Peso planta (Kg)	4.9 \pm 0.9
% Humedad	24.8 \pm 2.6
No. hojas/planta	11 \pm 2.0
Altura planta (cm)	366.4 \pm 21.1
Largo Raíz (cm)	30.2 \pm 8.1
Ancho raíz (cm)	53.2 \pm 1.3
Perímetro tallos (cm)	2. 7 \pm 0.9

Conclusiones

La PTAR del Fraccionamiento la Huerta en Centro Tabasco, muestra ser una tecnología viable y factible para la biorremediación de aguas residuales aún con falta de mantenimientos correctivos y con los cambios que se presentaron durante la pandemia (carga y gasto), pues al disminuir el gasto de operación se benefició el tiempo de retención hidráulica. La PTAR alcanzó una eficiencia suficiente para cumplir con el límite máximo permisible de DQO de 100 mg/l establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021, pues removió el 84.1% de DQO de durante julio y 43.7% durante diciembre de 2021. Del mismo modo cumplió con criterios de descarga para pH (6.5 a 10) y temperatura por debajo de 35°C y los SDT, CE, POR cumplieron los criterios ecológicos de calidad del agua CECA. La *Typha dominguensis* presentó un contenido energético de 3275 kcal/kg, siendo un combustible de bajo poder calorífico por lo que es susceptible de incendiarse en periodos de estiaje. Por lo anterior, se podrían combinar otras especies en el humedal como *Pontederia sagittata* y *Sagittaria lancifolia*, sembrar algas y macrófitas flotantes en el estanque (serpentín) y en el último canal colocar grava de ¾ de pulgadas para filtrar las algas, finalmente implementar un sistema de desinfección de UV para la eliminación de patógenos en el efluente.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos al Ing. Luis Contreras Delgado Coordinador del Sistema del Agua y Saneamiento del Municipio de Centro, por la facilidad para la realización de este trabajo. Del mismo modo agradecemos a los jóvenes del Laboratorio de Tecnología del Agua que participaron en esta campaña y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por ser nuestra Alma Mater.

Bibliografía

- Acevedo Cifuentes D. R.; Builes Felizzola S. M.; Ordoñez Ante C. A.; López Sánchez I. J. (2012). Remoción de microorganismos patógenos presentes en un licor mixto bajo condiciones de laboratorio empleando filtros empacados en zeolita natural. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 11, No. 21 pp. 39-52 - ISSN 1692-3324 - julio-diciembre de 2012/200 p. Medellín, Colombia. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v11n21/v11n21a04.pdf>
- Arteaga-Cortez V. M., Quevedo-Nolasco A. del Valle-Paniagua D. H., Castro-Popoca M., Bravo-Vinaja Á. Ramírez-Zierold J. A. (2019). State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 10(5), 319-342. <https://doi.org/10.24850/ji-tyca-2019-05-12>
- Briones Sánchez G, García Casillas I. (2014). Aforo del agua en canales y tuberías. Editorial Trillas. 100 p. ISBN: 9789682474880
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019a). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales. (<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>).
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019b). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2019. Comisión Nacional del Agua.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019c). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 26. Diseño de PTARM: Pretratamiento y tratamiento primario. (<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>).
- Chiva Vicent S., Berlanga Clavijo J. G., Martínez Cuenca R. Climent Agustina J. (eds.). (2018). Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia. Publicacions de la Universitat Jaume I, D.L. ISBN: 978-84-16546-65-7. <http://dx.doi.org/10.6035/UJI.FACSA.2018.2>
- Crites R; Tchobanoglous G. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Santafé de Bogotá Colombia. 776 páginas. ISBN 0-07-289087-8 Obra completa. ISBN 0958-41-0042-4 impresión de 2004.
- Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89.DOF: 13/12/1989. <http://legismex.mty.itesm.mx/acu/acca001.pdf>
- De Turrís A., Ocando Li., de Romero M. F., Fernández M. (2013). ¿Pueden los Microorganismos Impactar los Materiales de Construcción? Una Revisión. Gtl.S.N.N.Nro. 1856-9560 / Volumen Nro. 10 Enero - Diciembre 2013.
- Gestión Ambiental Mexicana [GAM]. (2000). Apartado Federal, Normas Técnicas Mexicanas. D.R. Cultura Ecológica A.C.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M. y von Muench, E. (2011). Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Eschborn, Alemania: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania- Programa de Saneamiento Sostenible. <https://www.susana.org/resources/documents/default/2-1235-giz2011-technology-review-constructed-wetlands-in-spanish.pdf>.
- Kadlec, R. H., y Wallace, S. (2009). Treatment wetlands. Second edition. Boca Raton: CRC Press Taylo & Francis Group. Pp 348.
- Li, Y. H, Zhu, J. N., Liu, Q. F., Liu, Y., Liu, M., Liu, L. and Zhang Q. (2013). Comparison of the diversity of root-associated bacteria in Phragmites australis and Typha angustifolia L. in artificial wetlands. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 29(8), 149.9-508.
- López Ocaña G. (2017). Combustión de materiales lignocelulósicos derivados de RSU. Combustión experimental en un reactor de lecho fluidizado. Primera edición. Editorial Académica Española. 122 pág. ISBN: 978-3-8417-6512-3
- Martelo J., Lara Borrero J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. ingeniería y Ciencia, ISSN 1794-9165, Volumen 8, número 15, enero-junio de 2012, páginas 221-243.
- Marín-Muñiz, J.L.; Sandoval Herazo, L.C.; López-Méndez, M.C.; Sandoval-Herazo, M.; Meléndez-Armenta, R.Á.; González-Moreno, H.R.; Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. Processes 2023, 11, 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-003-AGUA-2002, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el Distrito Federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. <https://paot.org.mx/centro/normas/NADF-003-AGUA-2002.pdf>

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF: 11/03/2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Pampillón González L., Cisneros Morales L.F., López Ocaña G. (2019). Producción De Biogás: Fundamentos y Parámetros de Diseño. Primera Edición. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 57 pág. ISBN: 978-607-606-520-4
- Romellón-Cerino, M.J., Estrada-Pérez, N. y López-Ocaña, G. 2022. Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S), Vol. 3, No. 1, 24-34. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a3_v3n1_reb_s.pdf
- Solís Silván, R.; López Ocaña, G.; Bautista Margulis, R.G.; Hernández Barajas, J.R.; Romellón Cerino, M.J. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. Interciencia, vol. 41, núm. 1, pp. 40-47.
- Tchobanoglous G. Metcalf y Eddy. (2003). Wasterwater Ingeneering. Treatment, Disposal and Reuse. MC Graw Hill. 1819 p.
- Tchobanoglous G., Theisein H., Vigil S. A. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Edit. McGraw-Hill. México D. F. 607 páginas.
- Thalla A. K., Devatha C. P., Anagh-K., Sony E. (2019). Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. Applied Water Science (2019) 9:147. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1014-9>
- Tran H.D., Vi H.M.T., Dang H.T.T., Narbaitz R.M. (2019). Pollutant removal by Canna Generalis in tropical constructed wetlands for domestic wastewater treatment. Global J. Environ. Sci. Manage. 5(3): 331-344, Summer 2019. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.03.06>
- Vázquez González M.B., López Ocaña G. (2011). Evaluación Técnica de un Tanque Imhoff para el tratamiento de aguas residuales en Centro, Tabasco. UNACAR Tecnociencia 5(1): 32-47.